

УДК 629.584:004.942
Б 69

МОДЕЛЮЮЧИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ РУХУ ПРИВ'ЯЗНОЇ ПІДВОДНОЇ СИСТЕМИ «СУДНО-НОСІЙ-ПІДВОДНИЙ АПАРАТ-МАНІПУЛЯТОР»

О. В. Блінцов, канд. техн. наук;

В. А. Надточій, аспірант

Національний університет кораблебудування, м. Миколаїв

Анотація. Розроблено спеціалізований моделюючий комплекс для комп'ютерного дослідження динаміки руху прив'язної підводної системи «судно-носій-підводний апарат-підводний маніпулятор» в умовах нестаціонарності власних параметрів і невизначеності зовнішніх збурень.

Ключові слова: моделюючий комплекс, прив'язна підводна система, підводний апарат, маніпулятор.

Аннотация. Разработан специализированный моделирующий комплекс для компьютерного исследования динамики движения привязной подводной системы «судно-носитель-подводный аппарат-подводный манипулятор» в условиях нестационарности собственных параметров и неопределенности внешних возмущений.

Ключевые слова: моделирующий комплекс, привязная подводная система, подводный аппарат, манипулятор.

Abstract. The specialized simulation complex has been developed for the computer research of the motion dynamics of a tethered underwater system «carrier-underwater vehicle-underwater manipulator» under the conditions of the non-stationarity of its parameters and the uncertainty of the external disturbances.

Keywords: simulation complex, tethered underwater system, underwater vehicle, manipulator.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Прив'язні підводні системи (ППС) із самохідними підводними апаратами (ПА) належать до найбільш ефективних засобів морської техніки, оскільки реалізують безлюдні підводні технології та дають змогу в реальному часі виконувати гідроакустичний і візуальний пошук та обстеження підводних об'єктів [3]. До суттєвих переваг такої техніки перед іншими підводними засобами можна віднести можливість дистанційного керування підводними маніпуляторами (ПМ), що встановлюються на ПА як зовнішнє націпне обладнання. Це надає підводному апарату принципово нові експлуатаційні можливості для виконання підводних маніпуляційних робіт: складних вимірювань, різання і зварювання, підводного будівництва тощо [11].

Практика авторів свідчить, що виконання підводних маніпуляційних робіт на базі ППС із ПА та ПМ є нетривіальною технічною задачею з позицій теорії керування, оскільки підводна система характеризується нестаціонарністю її власних параметрів, а також невизначеністю зовнішніх збурень, які впливають не тільки на підводну частину ППС, а і на судно-носій (СН) [13].

Сучасні технології застосування ППС передбачають автоматизацію керування їх просторовим рухом, оскільки виконуються у складних морських умовах. Невід'ємною частиною синтезу систем автоматичного керування (САК) є дослідження властивостей ППС на основі басейнових, морських натурних випробувань та/або шляхом комп'ютерного моделювання. Останній метод досліджень економічно є найбільш ефективним,

а також забезпечує широкі можливості дослідника для зміни експлуатаційних параметрів і вивчення об'єкта керування з відносно невеликими витратами часу.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

На сьогодні створено ряд моделюючих комплексів для дослідження ППС. У роботах [2, 5] пропонуються комплекси для дослідження відповідно буксируваних та самохідних систем під квазістаціонарним впливом кабель-троса (КТ). У статті [8] розроблено моделюючий комплекс з урахуванням динаміки руху КТ для дослідження буксированого ПА. Ряд публікацій присвячено моделюванню автономних ПА [7]. Відомості про моделюючі комплекси для дослідження ПМ майже відсутні, а в науковій літературі висвітлені в основному теоретичні питання моделювання маніпуляторів, призначених для використання в атмосферних умовах [12].

Тому актуальною задачею є розробка адекватної математичної моделі (ММ) прив'язної підводної системи «СН-ПА-ПМ» і спеціалізованого моделюючого комплексу на її основі для комп'ютерного дослідження динаміки морської системи такого типу та визначення ефективності синтезованих САК нею.

МЕТА РОБОТИ — розробка спеціалізованого моделюючого комплексу для комп'ютерного дослідження динаміки руху прив'язної підводної системи «СН-ПА-ПМ» в умовах нестаціонарності власних параметрів і невизначеності зовнішніх збурень та перевірки ефективності систем керування такою системою.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

До складу ППС «СН–ПА–ПМ» входять власне самохідний підводний апарат зі встановленим на ньому підводним маніпулятором, його кабель-трос, судноносій, кабельна лебідка (КЛ) та пост енергетики і керування (ПЕК) (рис. 1).

Зазвичай маніпуляційні підводні роботи виконуються при якірній стоянці СН, при цьому в більшості випадків усі елементи ППС знаходяться в діаметральній площі СН [1], тому в даній роботі розробку моделюючого комплексу виконаємо для плоскої постановки задачі.

Математичні моделі більшості елементів ППС цілком достатньо наведене в літературі. Для того щоб поєднати їх в єдиний взаємодіючий комплекс, необхідно виділити входи й виходи окремих моделей, сформувати математичне забезпечення для їх реалізації та об'єднати їх відповідним чином. Рух складових ППС у діаметральній площині СН характеризується трьома степенями вільності: двома поступальними та одним обертю.

Тому величини, які характеризують поступальний рух, позначені векторами, обертю — скалярними величинами (рис. 2).

Корінний кінець КТ зазвичай розташовується в кормі СН, тому ММ СН генерує радіус-вектор точки розташування корінного кінця КТ \vec{P}_k по відношенню до початку базової системи координат (БСК). У даній постановці немає необхідності повністю моделювати рух СН як фізичного тіла, що рухається в просторі під впливом вітрохвильових збурень, оскільки СН знаходиться на якірній стоянці й рухається під впливом хитами. Тому достатньо задати закон руху корми СН у вигляді залежності

$$\vec{P}_k = \vec{f}(t, b),$$

де t — час моделювання; b — параметр, що характеризує морське хвилювання.

Сила натягу \vec{F}_k , яка з'являється на корінному кінці КТ, діє на СН, проте для суден з водотоннажністю більше 100 т цей вплив незначний, тому для моделювання руху СН під впливом хитами використаємо відомі залежності вигляду [10]

$$\vec{P}_k = \vec{f}(t, b, m).$$

Динаміку руху КТ у роботі [4] пропонується моделювати як взаємозв'язаний рух певної кількості його елементів, кожний з яких взаємодіє з набігаючим потоком води згідно із законами гідромеханіки та із сусідніми елементами через сили пружної деформації. Чим більшою кількістю елементів буде представлено КТ, тим точнішу модель отримаємо, але тим більшими будуть витрати комп'ютерного часу на моделювання. На вхід ММ КТ подаються координати його корінного \vec{P}_k і ходового \vec{P}_x кінців та швидкість

течії V_T на виході отримуємо сили натягу на корінному \vec{F}_k і ходовому \vec{F}_{KT} кінцях КТ:

$$\left. \begin{aligned} \vec{F}_k &= \vec{f}(\vec{P}_k, \vec{P}_x, L_{KT}, V_T); \\ \vec{F}_{KT} &= \vec{f}(\vec{P}_k, \vec{P}_x, L_{KT}, V_T). \end{aligned} \right\}$$

Момент КТ визначається з векторного добутку

$$\vec{M}_{KT} = \{0, 0, M_{KT}\} = \vec{P}_x \times \vec{F}_{KT},$$

де \vec{M}_{KT} — вектор моменту, який виникає на корпусі підводного апарата (КПА) внаслідок дії КТ; \vec{P}_x — радіус-вектор, який з'єднує початок зв'язаної з ПА системи координат (ЗСК) та ходовий кінець КТ.

Оскільки рух ППС відбувається в діаметральній площині СН, то проекції вектора \vec{M}_{KT} на абсцису та ординату мають нульові значення, а момент від КТ можна розглядати як скалярну величину:

$$M_{KT} = xF_{KTy} - yF_{KTx},$$

де x і y — проекції вектора \vec{P}_x на осі абсцис та ординат ЗСК відповідно; F_{KTx} і F_{KTy} — проекції вектора \vec{F}_{KT} на осі абсцис та ординат ЗСК відповідно.

Кабельна лебідка являє собою барабан радіуса R_0 , який приводиться до руху через редуктор електродвигуном (ЕД) постійного струму. Виходом ММ КЛ є довжина випущеної частини КТ L_{KL} на вхід подаються сила натягу корінного кінця КТ \vec{F}_k та сигнал керування електродвигуном КЛ u_{KL} :

$$\left. \begin{aligned} L_{KT} &= R_0 \int \omega_0 dt + L_0; \quad v_L = \frac{dL_{KT}}{dt}; \\ J_{KL} \frac{d\omega_0}{dt} &= \frac{M_{ED}}{k_p} - M_0; \quad M_0 = R_0 |\vec{F}_k|; \\ M_{ED} &= f(u_{KL}, \omega_0, M_0, k_p), \end{aligned} \right\}$$

де ω_0 — кутова швидкість обертання барабана КЛ, L_0 — початкове значення довжини випущеної частини КТ; v_L — швидкість випускання/підбирання КТ; J_{KL} — момент інерції системи «ЕД–барабан–КТ», приведений до барабана КЛ; M_{ED} — електромагнітний момент ЕД, k_p — коефіцієнт передачі редуктора ЕД; M_0 — навантажувальний момент, який виникає на барабані КЛ унаслідок дії сили натягу корінного кінця КТ.

Величина M_{ED} визначається на основі відомих рівнянь, які описують роботу ЕД постійного струму.

Слід зазначити, що зазвичай КТ намотується на барабан КЛ у декілька шарів і при його випусканні/підбиранні змінюється довжина залишку КТ на барабані, що спричиняє відповідну зміну величин R_0 та J_{KL} . Проте основний режим роботи ПА не передбачає значної зміни довжини попущеної частини КТ, тому вплив залишку КТ на барабані на величини R_0 та J_{KL} незначний і в ММ КЛ ці величини взято константами.

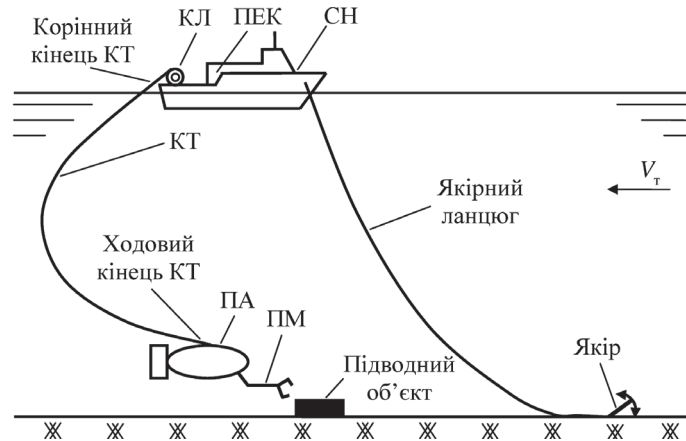


Рис. 1. Склад прив'язної системи «СН-ПА-ПМ»

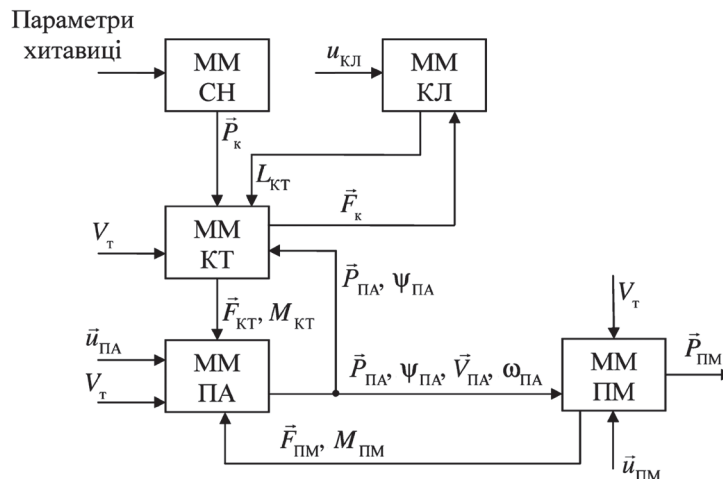


Рис. 2. Структура моделюючого комплексу

Математична модель ПА як тіла, що рухається в просторі, являє собою складну систему взаємодії ММ його елементів: КПА, рушійного комплексу (РК), блока плавучості (БП) та гідродинамічних впливів (ГДВ) (рис. 3).

У даній роботі прийнято, що КПА має форму еліпсоїда обертання. Відповідну математичну модель для тривимірного простору наведено в [6]. Ураховуючи, що рух ПА відбувається в діаметральній площині СН із трьома степенями вільності, ММ спрощується та набуває такого вигляду:

$$\left. \begin{aligned} m_x \frac{dV_x}{dt} - m_y \omega_{ПА} V_y &= F_x; \\ m_y \frac{dV_y}{dt} + m_x \omega_{ПА} V_x &= F_y; \\ J_z \frac{d\omega_{ПА}}{dt} + V_x V_y (m_y - m_x) &= M_z, \end{aligned} \right\}$$

де m_x, m_y — маса ПА з приєднаними масами води по відповідних осях ЗСК; V_x, V_y — проекції вектора швидкості поступального руху ПА $\vec{V}_{ПА}$ на відповідні

осі ЗСК; $\omega_{ПА}$ — кутова швидкість обертання ПА відносно зв'язаної поперечної осі; F_x, F_y — проекції вектора рівнодіючої зовнішніх сил $\vec{F}_{ПА}$ на відповідні осі ЗСК; J_z — момент інерції ПА з приєднаними моментами інерції відносно поперечної осі ЗСК; M_z — рівнодіюча зовнішніх моментів, які впливають на КПА.

Виходами ММ КПА є кінематичні параметри ПА: $\vec{R}_{ПА}$ — радіус-вектор, який з'єднує центр мас ПА та початок БСК, $\vec{V}_{ПА}, \psi_{ПА}$ — диферент ПА, $\omega_{ПА}$.

Вектор рівнодіючої сили $\vec{F}_{ПА}$ визначається за формулою

$$\vec{F}_{ПА} = \vec{F}_{БП} + \vec{F}_{ГДВ} + \vec{F}_{РК} + \vec{F}_{КТ} + \vec{F}_{ПМ},$$

де $\vec{F}_{БП}$ — сила блока плавучості; $\vec{F}_{ГДВ}$ — сила гідродинамічного впливу, яка створюється набігаючим потоком води; $\vec{F}_{РК}$ — сила рушійного комплексу; $\vec{F}_{КТ}$ — сила підводного маніпулятора.

Підводні апарати, як правило, проектується таким чином, щоб забезпечити нульову плавучість, тобто виштовхуюча сила компенсується силою ваги

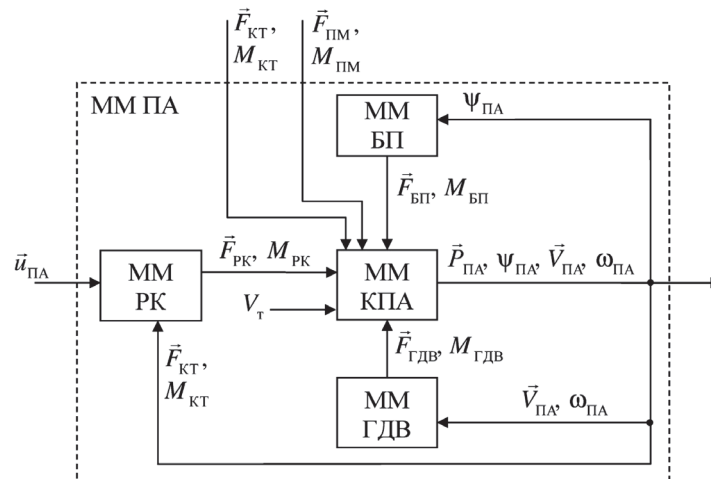


Рис. 3. Структура моделі ПА

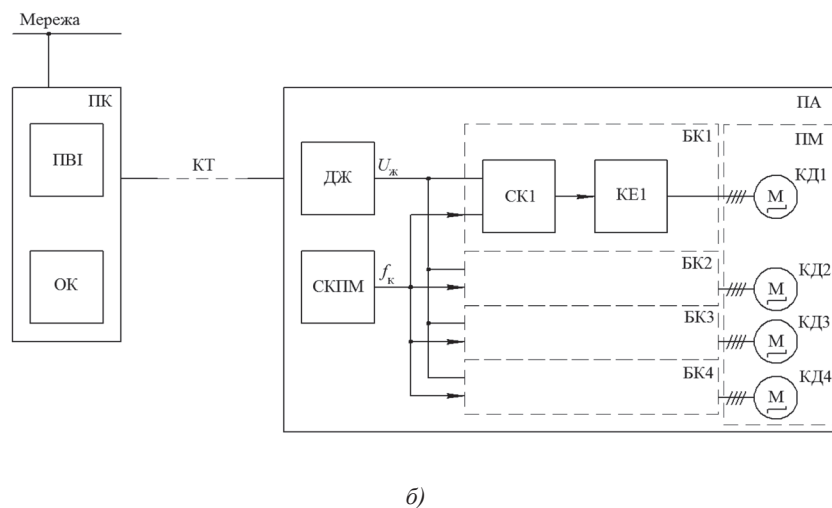
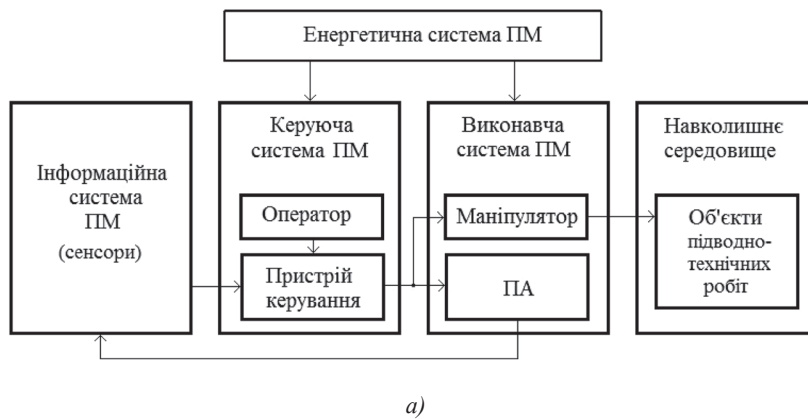


Рис. 4. Структурна схема (а) та система керування ПМ (б): ПК — пульт керування ПМ; ПВІ — пристрій відображення інформації ПА; ОК — органи керування ПМ; ДЖ — джерело живлення; СКПМ — система керування ПМ; БК — блок керування ланкою ПМ; М — ланка маніпулятора; СК — система керування електроприводом ланки ПМ; КЕ — комутаційні елементи керування електроприводом ланки ПМ; $U_{\text{ж}}$ — напруга живлення; $f_{\text{к}}$ — керуючі сигнали крокового двигуна (КД) ПМ

ПА, тому результуючий вектор сили БП $\vec{F}_{\text{БП}}$ дорівнює нулю. Сили $\vec{F}_{\text{КТ}}$ та $\vec{F}_{\text{ПМ}}$ являють собою зовнішні збурення.

Рівнодіючий момент МПА визначається за формулою

$$M_{\text{ПА}} = M_{\text{БП}} + M_{\text{ГДВ}} + M_{\text{РК}} + M_{\text{КТ}} + M_{\text{ПМ}},$$

де $M_{\text{БП}}$ — момент блока плавучості; $M_{\text{ГДВ}}$ — момент гідродинамічного впливу, який створюється внаслідок обертання КПА в потоці води; $M_{\text{РК}}$ — момент рушійного комплексу, $M_{\text{ПМ}}$ — момент підводного маніпулятора (моменти $M_{\text{КТ}}$ та $M_{\text{ПМ}}$ являють собою зовнішні збурення).

Математичні моделі БП та ГДВ докладно розглянуті в роботі [6]. Математичну модель РК ПА, обладнаного двома маршовими та одним вертикальним рушійним пристроєм (РП), можна подати у такому вигляді:

$$\left. \begin{aligned} \vec{F}_{\text{РК}} &= \{F_{\text{РКх}}, F_{\text{РКу}}\}; \\ F_{\text{РКх}} &= F_{\text{РПл}} + F_{\text{РПп}}; \quad F_{\text{РКу}} = F_{\text{РПв}}, \end{aligned} \right\}$$

де $F_{\text{РКх}}$ і $F_{\text{РКу}}$ — проекції вектора $\vec{F}_{\text{РК}}$ на осі абсцис та ординат ЗСК відповідно; $F_{\text{РПл,п,в}}$ — упори відповідно лівого маршового, правого маршового та вертикального РП.

Упор кожного РП розраховується на основі відомої моделі «ЕД–редуктор–гребний гвинт» [9] і в загальному випадку залежить від відповідної складової керуючого вектора $\vec{u}_{\text{ПА}}$ та вектора швидкості набігаючого потоку води $\vec{V}_{\text{ПА}}$.

Математичне моделювання ПМ виконується для маніпулятора з чотирма степенями вільності (рис. 4). Електроживлення подається від джерела енергії ППС на ПМ у вигляді керуючого вектора $\vec{u}_{\text{ПМ}}$.

Через блок керування сигнали керування окремо подаються на кожний виконавчий електропривод (КД) відповідної ланки ПМ.

Моделювання кінематики ПМ виконується за відомими рівняннями для розв'язання прямої та зворотної задач [12]. Пряма задача кінематики — визначен-

ня положення й орієнтації кінцевої ланки (затискача) ПМ $\vec{p}_{\text{ПМ}}$ в обраній системі координат за заданим значенням узагальнених координат.

Задача дає змогу визначити геометричні характеристики робочої зони ПМ зі складною кінематичною схемою при конструктивних обмеженнях на УК. Зворотна задача кінематики полягає у визначенні УК, якщо задані в опорній СК положення кінцівки або якої-небудь іншої ланки.

Моделюючий комплекс для комп'ютерного дослідження динаміки руху ППС із ПМ реалізовано в середовищі Simulink пакета MatLab. Він дає змогу моделювати рух кінцівки маніпулятора в діаметральній площині СН за допомогою керуючих впливів $\vec{u}_{\text{ПА}}$, $\vec{u}_{\text{ПМ}}$ і $u_{\text{кл}}$ під дією невизначених зовнішніх збурень та в умовах нестационарності власних параметрів. Основні невизначені збурення моделюються величинами $\vec{F}_{\text{КТ}}$, $\vec{F}_{\text{ПМ}}$, $M_{\text{КТ}}$, $M_{\text{ПМ}}$, b та V_p , основні нестационарні власні параметри — $L_{\text{КТ}}$, масою підводного об'єкта, з яким взаємодіє ПМ. Попередня перевірка працездатності спеціалізованого моделюючого комплексу показала, що він є ефективним інструментом дослідження САК ППС «СН–ПА–ПМ» в умовах невизначеності зовнішніх збурень та нестационарності власних параметрів ППС.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено структуру спеціалізованого моделюючого комплексу прив'язної підводної системи «судно-носії–підводний апарат–підводний маніпулятор» як основу для його програмної реалізації на базі вхідних та вихідних величин математичних моделей її елементів.

2. Створено спеціалізований моделюючий комплекс на основі розробленої структури та математичних моделей елементів прив'язної підводної системи для комп'ютерного дослідження динаміки руху прив'язної підводної системи «судно-носії–підводний апарат–підводний маніпулятор» в умовах нестационарності власних параметрів і невизначеності зовнішніх збурень та перевірки ефективності систем керування такою системою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] **Блінцов, В. С.** Базові технології застосування підводних апаратів-роботів для задач морської археології [Текст] / В. С. Блінцов, С. О. Воронов // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : матеріали Міжнарод. наук.-техн. конф. — Миколаїв : НУК, 2010. — С. 389–391.
- [2] **Блинцов, В. С.** Моделирующий комплекс для исследования свойств подводной буксируемой системы как объекта управления [Текст] / В. С. Блинцов, Н. Т. Лонг // 36. наук. пр. Института проблем моделирования в энергетике им. Г. Е. Пухова. Спец. вып. : у 2 т. Т. 1. — К. : НАН України, ІПМЕ ім. Г. Е. Пухова. 2005. — С. 22–27.
- [3] **Блинцов, В. С.** Проектирование самоходных привязных подводных систем [Текст] / В. С. Блинцов, В. Э. Магула. — К. : Наукова думка, 1997. — 140 с.

- [4] **Блінцов, О. В.** Математичне моделювання динаміки руху кабель-троса прив'язної підводної системи [Текст] / О. В. Блінцов // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : матеріали Міжнар. наук.-техн. конф. — Миколаїв : НУК, 2012. — С. 529–532.
- [5] **Блінцов, О. В.** Моделюючий комплекс для дослідження системи керування просторовим рухом самохідної прив'язної підводної системи [Текст] / О. В. Блінцов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — Харьков, 2007. — Вып. 4/4 (28). — С. 6–10.
- [6] **Лукомский, Ю. А.** Навигация и управление движением судов [Текст] : учебник / Ю. А. Лукомский, В. Г. Пешехонов, Д. А. Скороходов. — СПб. : Элмор, 2002. — 360 с.
- [7] Программный комплекс моделирования пространственного движения автономного подводного аппарата [Текст] / В. Ф. Филаретов, В. А. Бобков, Д. А. Юхимец, С. В. Мельман, Ю. С. Борисов // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2007. — № 1. — С. 8–13.
- [8] Специализированный моделирующий комплекс для исследования эффективности системы управления подводной буксируемой системы [Текст] / А. В. Блинцов, Ж. Ю. Бурунина, П. Г. Клименко, Чан Там Дык // Зб. наук. пр. НУК. — Миколаїв : НУК, 2012. — № 1 (442). — С. 92–97.
- [9] **Ставинський, А. А.** Удосконалення математичної моделі самохідного підводного апарата для дослідження просторового руху [Текст] / А. А. Ставинський, С. В. Блінцов // Зб. наук. пр. НУК. — Миколаїв : НУК, 2004. — № 3 (396). — С. 161–166.
- [10] **Чижиумов, С. Д.** Основы динамики судов на волнении [Текст] : учеб. пособие / С. Д. Чижиумов. — Комсомольск-на-Амуре : ГОУВПО «КНАГТУ», 2010. — 110 с.
- [11] **Шостак, В. П.** Подводные аппараты-роботы и их манипуляторы [Текст] / В. П. Шостак. — Чикаго : Мегатрон, 2011. — 134 с.
- [12] **Юревич, Е. Ю.** Управление роботами и робототехническими системами. [Текст] / Е. Ю. Юревич. — СПб., 2000. — 171 с.
- [13] **Moore, S.** Underwater Robotics: Science, Design & Fabrication [Text] / S. Moore, H. Bohm, V. Jensen. — Marine Advanced Technology Education (MATE) Center, 2010. — 770 p.

© О. В. Блінцов, В. А. Надточій

Надійшла до редколегії 05.03.2012

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК
д-р техн. наук, проф. Павлов Г. В.

Статтю розміщено у Віснику НУК № 3, 2012